

长江经济带物流业碳排放效率的测度及时空演化特征研究

林秀群¹ 李嘉新¹ 李阳¹ 唐向阳²

(1. 昆明理工大学管理与经济学院, 云南昆明 650093;

2. 云南昆船环保技术有限公司, 云南昆明 650051)

【摘要】: 运用包含非期望产出的超效率 SBM 与 Malmquist 指数模型对 2005—2019 年长江经济带的物流业碳排放效率进行分析, 并使用莫兰指数对空间自相关性进行了研究。结果表明:

(1) 样本期内, 长江经济带物流业碳排放效率均值为 0.671, 三个区域整体表现为“上游<中游<下游”的形式。(2) 纯技术效率和规模效率的提高直接促进了长江经济带碳排放效率的不断增长, 上、中、下游地区的碳排放效率均呈现一定幅度的提升。云南省的物流业碳排放效率在整个长江经济带进步最为明显, 而湖南省和四川省呈现负增长的趋势。(3) 长江经济带物流业碳排放效率全局空间自相关性呈现由弱到强的演变趋势, 局部空间异质性不断减弱, 空间差异不断缩小。为进一步提高长江经济带物流业低碳化发展水平, 应当助力产业的转型升级, 转化科研成果至产业能源结构改革, 推动上、中、下游三个区域的优势互补。

【关键词】: 长江经济带 物流业 DEA-Malmquist 空间自相关性 时空演化

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)12-031-08

作为我国经济增长极之一的长江经济带, 有着区域广阔、人口众多和经济体量大的显著特点, 其已成为我国覆盖面广、功能丰富、集聚辐射能力较强的重要区域。长江经济带覆盖了 9 省 2 市, 其上游、中游和下游横跨我国东中西部三大板块, 对我国区域发展规划起着至关重要的战略拉动作用^[1]。而物流产业作为区域经济发展的优势黄金产业, 是长江经济带当前朝着高质量发展目标前进的主要保障之一。长江经济带物流业能源消费强度在行业中持续处于较高水平, 油品消费量更是居行业首位, 碳排放量也是行业中增长速度最快的^[2]。2005—2019 年, 长江经济带物流业能源消耗量由 6660.16 万吨标准煤上升到 23311.42 万吨标准煤, 增长了 250.01%。2019 年, 长江经济带物流业碳排放量为 33810.77 万吨, 相比 2015 年的 13761.17 万吨增长了 20049.6 万吨, 增速达 145.70%。自 2003 年以来, 相比较于我国五大行业, 物流业是其中唯一碳强度升高的部门, 且表现出稳定增长的趋势^[3]。“十四五”中提出贯彻“2030 年气候变化国家自主贡献目标”, 将清洁能源高效利用在工业等领域, 实现能源结构调整。习近平主席在 2020 年 9 月和 12 月两次提出并明确中国要在 2030 年前实现“碳达峰”, 2060 年实现“碳中和”。由此可见, 作为以化石燃料为主的碳排放重点行业, 物流业要想实现 2030 年的达峰目标, 需要在明确行业碳排放总量目标的基础上, 建立碳排

¹**基金项目:** 国家自然科学基金项目“少数民族地区易地扶贫搬迁后农户生计资本的重构影响机理及提升策略研究——以云南为例”(72064025); 教育部规划基金项目“云南少数民族农户生计能力持续提升的动力机制研究”(20XJA630002)

第一作者简介: 林秀群, 硕士, 副教授, 研究方向为生态文明建设。E-mail: 18256953055@163.com

放效率提升的目标。因此，对长江经济带物流业碳排放效率进行测算，并分析其时序特征和空间特征，对于绿色长江经济带的实现具有一定的指导意义。

关于碳排放效率方面的研究，学者们从碳排放效率的理论探讨到如何有效提升碳排放效率展开了多维度的研究。碳排放效率是在生产率的大框架下，对碳排放进行阐述的指标。学术界关于碳排放效率的定义主要是以能源效率为依据，主要分为两种，一种是采用单个要素的指标来对碳排放效率进行评价，如 Kaya&Yokobori^[4]提出的碳生产率概念，Mielnik&Goldemberg^[5]提出的碳指数概念，Jobert 等^[6]提出的碳强度概念等。另外一种学者们开始从全要素的角度来对碳排放效率展开测度。如 Zofio&Proeto^[7]构建了 DEA 模型对 OECD 国家的制造业碳排放效率进行了测算；Ramanathan^[8]将碳排放量整合到经济系统中对碳排放效率进行较为全面地评价；Zhou 等^[9]将松弛变量纳入对 30 个 OECD 国家的全要素碳排放效率中。在碳排放效率的静态研究中，由于 DEA 模型无须对决策单元内部的生产关系预先判断得到了广泛使用，如使用 BCC-DEA 模型^[2]、SBM-DEA 模型^[10]、两阶段 SuperSBM 模型^[11]、超效率 SBM 模型^[12]、三阶段 DEA 模型^[13]等。与碳排放效率的静态研究相比，动态研究的开展仍比较少，如 Lin&Fei^[14]、吴贤荣等^[15]、王兆峰和杜瑶瑶^[16]、欧国立和许畅然^[17]、邵海琴和王兆峰^[18]、李铭泓等^[19]分别用 Malmquist 模型对不同行业的碳排放效率进行了动态变化的测度。松弛变量对效率测度的改变在传统 DEA 模型中无法体现，并且相对于传统 DEA 模型只考虑了投入和产出的等比例缩短或增加，SBM 模型正好能够解决面临的这个难题。另外，在使用传统 DEA 模型时无法将非期望的产出作为投入要素，就要使用距离函数法、数据转换函数法或曲线测度评价法，而使用 SBM 模型则无须另作处理，且能够解决多个在生产前沿面决策单元效率为 1 无法进行比较的问题。

基于此，本文将在全要素生产率框架下采用包含非期望产出的超效率 SBM 模型和 Malmquist 指数对 2005—2019 年长江经济带的物流业碳排放效率进行静态和动态分析，并利用探索性空间分析法探讨其空间演化特征，探索效率分析工具在物流业领域的适用性。

1 研究方法

1.1 研究方法

1.1.1 碳排放量估算模型

《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》中介绍的能源消费碳排放计算的方法包括以下三种：（1）分部门计算的一般方法，将不同行业和类型的消费以“自下而上”的形式统计；（2）分部门计算的优良方法，以实际测量的排放因子替换原有的排放因子进行计算；（3）能源表观消费量的参考方法，以“自上而下”的形式通过能源消费量的数据进行统计。本文参照多数学者[20-22]对碳排放量估算中基于能源表观消费量的方法，依据各个决策单元能源的消费量计算碳排放量，8 种能源的平均低位发热量、单位热值含碳量、碳氧化率和二氧化碳排放系数由表 1 所示，碳排放量的计算见式（1）。

能源消费碳排放=Σ[能源消费量×平均低位发热量×单位热值含量×氧化率×(44/12)]（1）

表 1 能源的平均低位发热量、单位热值含碳量、碳氧化率

能源种类	原料煤	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	天然气	电力
平均低位发热量/（kJ/kg）	20908	43070	43070	42652	41816	50179	38931kJ/m ³	—
单位热值含碳量（吨碳/TJ）	26.37	18.9	19.5	20.2	21.1	17.2	15.3	—

碳氧化率	0.94	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	—
二氧化碳排放系数 / (kg-CO2/kg)	1.9003	2.9251	3.0179	3.0959	3.1705	3.1013	2.1622kg-CO2/m ³	0.10069kg-CO ₂ /kW·h

1.1.2 带有非期望产出的超效率 SBM 模型

传统的 DEA 模型存在无法区分最大效率值同为 1 的多个决策单元效率差异的缺陷。SBM 模型属于非角度、非径向的效率测度模型，虽然 U-SBM 模型^[23]考虑了非期望产出，但无法对等于 1 的 DMU 进行评价，仍属于标准效率模型；SE-SBM 模型实现了对超效率 DMU 的评价，但却忽视了非期望产出^[24]。因此，为了完成对碳排放效率更加准确的测度，本文使用的模型为包含非期望产出的超效率 SBM 模型。假设物流业碳排放生产过程中有 n 个决策单元，每个决策单元包含 m 个生产投入要素、q1 个期望产出要素和 q2 个非期望产出要素。本文中，n 表示长江经济带 11 个省份，投入要素为物流业固定资产、劳动力、能源消耗，期望产出为物流业增加值，非期望产出为物流业碳排放量，则测度物流业碳排放效率的非期望产出超效率 SBM 模型为：

$$\min \beta = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{ik}}{1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} s_r^+ / y_{rk} + \sum_{t=1}^{q_2} s_t^{b-} / b_{tk} \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \leq x_{ik} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j + s_r^+ \geq y_{rk} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n b_{tj} \lambda_j - s_t^{b-} \leq b_{tk} \\ \lambda_j, s_i^-, s_r^+, s_t^{b-} \geq 0 \\ i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, q_1; t = 1, 2, \dots, q_2; j = 1, 2, \dots, n (j \neq k) \end{cases} \quad (2)$$

式中：ρ 为测度的物流业碳排放效率；i、r、t 分别代表投入、期望产出和非期望产出决策单元；s_i⁻、s_r⁺、s_t^{b-} 为松弛变量；λ_j 为权重向量。

1.1.3 Malmquist 指数模型

DEA-Malmquist 指数方法通过 t 期到 t+1 期效率的变化测算动态碳排放效率。将每个省份看作一个决策单元，(x_t, y_t)、(x_{t+1}, y_{t+1}) 分别表示第 t 年、第 t+1 年的投入量和产出量，碳排放效率变化的 Malmquist 指数可以表示为：

$$M(x_{t+1}, y_{t+1}, x_t, y_t) = \left[\frac{d^t(x_{t+1}, y_{t+1})}{d^t(x_t, y_t)} \times \frac{d^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{d^{t+1}(x_t, y_t)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Färe 等^[25]将 Malmquist 指数分解为效率变化 (Effch) 和技术变化 (Techch)。其中，技术变化是源于决策单元生产技术的变化；效率变化是源于决策单元可利用的技术能力。

$$\begin{aligned}
& M(x_{t+1}, y_{t+1}, x_t, y_t) \\
& = Effch \times Techch \\
& = \frac{d^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{d^t(x_t, y_t)} \times \left[\frac{d^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{d^{t+1}(x_t, y_t)} \times \frac{d^t(x_{t+1}, y_{t+1})}{d^t(x_t, y_t)} \right]^{1/2}
\end{aligned} \tag{4}$$

其中，效率变化为规模报酬可变且要素随机处理条件下的相对效率变化指数，可将效率变化进一步分解为纯技术效率变化（Pech）和规模效率变化（Sech）。

$$\begin{aligned}
& M(x_{t+1}, y_{t+1}, x_t, y_t) \\
& = Pech \times Sech \times Techch \\
& = \frac{d_v^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{d_v^t(x_t, y_t)} \times \left[\frac{d_v^t(x_t, y_t)}{d_v^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})} \times \frac{d_c^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{d_c^{t+1}(x_t, y_t)} \right] \times \\
& \quad \left[\frac{d_c^t(x_t, y_t)}{d_c^{t+1}(x_t, y_t)} \times \frac{d_c^t(x_{t+1}, y_{t+1})}{d_c^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})} \right]^{1/2}
\end{aligned} \tag{5}$$

1.1.4 莫兰指数

空间自相关主要用来检验某要素与其邻近要素属性值在不同空间单元上的显著程度，也可以用来衡量研究对象空间聚集程度和关联度。全局自相关分析主要是描述观测变量在整个区域内的空间集体集聚程度，其计算公式为：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \tag{6}$$

式中： x_i 为省份 i 的观测值， n 为省份总数， w_{ij} 是空间矩阵；

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

，表示方差； $\bar{x}$ ，表示平均值。局部自相关空间分析主要揭示区域之间的

的空间聚集程度，用来描述局部单元与邻近空间单元的自相关程度，其计算公式为：

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{s^2} \tag{7}$$

1.2 指标选取与数据来源

纵观国内外产业分类体系，未有对物流业进行专门的数据统计，参考张立国^[26]的研究方法，使用物流业年度增加值比重达到 80% 以上的交通运输、仓储和邮政业的行业数据表示长江经济带物流业的特征。本文选取了 2005—2019 年四川、重庆、贵州、云南、湖北、湖南、安徽、江西、江苏、浙江、上海 11 个省

份相关要素的面板数据，每 1 个省份作为 1 个独立的决策单元，由此作为研究长江经济带物流业碳排放效率的依据。

研究行业碳排放效率首先要选取合理有效的投入与产出指标，现有文献中，多以行业固定资产投资额、能源消费量和相关从业人数等作为投入指标，以行业生产总值和温室气体排放量作为产出指标。具体来说，在投入指标方面：本文参考刘秉镰和李清彬^[27]、邓学平等^[28]的研究，选取物流业固定资产投资额作为资本投入，同时将固定资产投资额平减为 2004 年不变价格。除资本要素之外，选取物流业从业人数作为劳动力投入，能源投入选取物流业主要消耗能源量表示。在产出指标方面：期望产出为平减为 2004 年价格不变的物流业增加值，将碳排放量作为非期望产出。本文数据均整理自《中国能源统计年鉴》和《中国统计年鉴》，具体指标的相关解释如表 2 所示。

表 2 物流业碳排放效率指标体系

一级指标	二级指标	指标解释
投入指标	固定资产投资额	物流资本投入/亿元
	从业人员数	物流人员投入/万人
	能源消耗量	物流能源投入/万吨标准煤
产出指标	物流业增加值	物流业生产活动的最终成果/亿元
	二氧化碳排放量	物流业生产活动产生的二氧化碳/万吨

2 结果与分析

2.1 长江经济带物流业能源碳排放量评估

如图 1 所示，2005—2019 年长江经济带 11 个省份物流业的能源消费碳排放总量呈稳定增长的走向，从 13761.17 万吨增加到 33810.77 万吨，增长了 20049.6 万吨，增长率达到 145.69%。样本期内，增长态势逐渐放缓，2005—2009 年年平均增长率为 7.11%，2010—2014 年年平均增长率为 4.40%，2015—2019 年年平均增长率为 4.09%。长江经济带三个区域的物流业碳排放量基本逐年增长（图 1），只有在 2013 年，上游地区的碳排放量出现了下降，降幅为 7.52%。下游地区碳排放量最高。样本期内，长江经济带下游、中游、上游碳排放量平均值分别为 9856.11 万吨、6423.40 万吨和 7654.99 万吨。上游地区和中游地区的碳排放量在 2012 年前基本接近，之后逐渐拉开差距。上游地区、中游地区和下游地区样本期内年平均增长率相比较，上游地区增速最快，达 7.13%，中游地区次之，为 6.76%，下游地区增长最慢，仅为 5.12%。

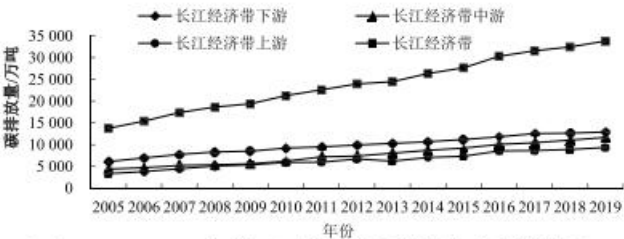


图1 2005—2019年长江经济带分区域物流业碳排放量

2.2 长江经济带物流业碳排放效率的时序特征分析

2.2.1 基于 SBM 模型的碳排放效率静态变化分析

根据包含非期望产出的超效率SBM模型测算出2005—2019年长江经济带各省份的物流业碳排放效率值,测算结果如图2所示。

从整体上来看,2005—2019年长江经济带11个省份物流业碳排放效率的波动较为平缓,均值为0.671,仍和生产前沿面有较大距离。其中,2010年的物流业碳排放效率达到最低,为0.531,2014年升至最高,为0.768;2005—2006年和2010—2014年总体呈上升的变化趋势,平均年增长率依次为1.31%和9.64%,其中2013—2014年增长率最高,达到17.61%,2006—2010年和2014—2019年呈总体下降的趋势,平均年增长率依次为-6.37%和-1.38%,2014—2019年碳排放效率的变化幅度相对较小。

从区域层面来看,物流业碳排放效率较高的省份较为集中地分布在长江经济带中下游地区,三个区域相比,下游地区碳排放效率最高,为0.899;中游地区次之,为0.708;上游地区最低,为0.463。上游地区和下游地区的物流业碳排放效率均呈现先波动上升后缓慢下降的趋势,而中游地区的物流业碳排放效率先在2011年降至最低值0.530后缓慢上升至0.866。三个区域中,下游、中游和上游地区的年平均增长率依次为1.14%、0.22%和-0.66%。



图2 2005—2009年、2010—2014年、2015—2019年长江经济带物流业碳排放效率均值

从省域层面来看,样本期内长江经济带物流业碳排放效率最高的3个省份分别为江苏(1.046)、江西(0.893)和浙江(0.888)。2005—2009年,物流业碳排放效率最高的3个省份为安徽(1.027)、江苏(1.006)和浙江(0.902);2010—2014年,物流业碳排放效率最高的3个省份为江苏(1.166)、湖北(0.935)和安徽(0.827);2015—2019年,物流业碳排放效率最高的3个省份为安徽(1.055)、浙江(1.053)和江苏(1.041),可见,长江经济带物流业碳排放效率达到生产前沿面的省份逐步增加。2005—2009年、2010—2014年和2015—2019年三个阶段,长江经济带物流业碳排放效率最低的省份均为云南,其碳排放效率在2005—2017年一直稳定在(0.1,0.3)的范围,2018—2019年出现上升分别达到0.498和0.495。这表明,长江经济带地区物流业的碳排放效率整体上有进步的趋势,但除江苏外的其他省份仍和生产前沿面有着较大的差距,说明长江经济带物流业节能减排的问题仍然需要进一步地监控和改善。

2.2.2 基于 Malmquist 模型的碳排放效率动态变化分析

由表3所示,从总体水平来看,2005—2019年长江经济带物流业碳排放效率平均提高了3.6%,纯技术效率、规模效率和技术进步变化分别提高了2.5%、1.9%和1.0%,表明长江经济带纯技术效率和规模效率不同程度的增强对物流业碳排放效率有积极作用。整体来看,样本期内碳排放效率呈现增减交替态势,2005—2015年,除了3个年度有短暂提升外,主要呈现连续下降的趋势;在2015年后则呈现连续增长的走向,平均年增长率为24.58%,其中2015—2016年增长幅度达到最高值54.6%。技术进步效率与碳排放效率在样本期内变动情况基本一致,在2014年前波动下降后呈现持续提升的趋势,在2015—2016年间增长了57.6%,

是碳排放效率提升的本质原因。2005—2019 年纯技术效率和规模效率均呈增长的变化趋势，增长幅度分别为 2.5%和 1.9%，二者在样本期内的变化幅度都相对较小。

表 3 分时段长江经济带物流业碳排放效率 Malmquist 指数及其分解

年份	纯技术效率指数变化	规模效率指数变化	技术进步指数变化	碳排放效率指数变化
2005—2006	0.949	1.103	0.960	0.970
2006—2007	0.986	0.966	0.906	0.857
2007—2008	0.928	1.055	0.935	0.894
2008—2009	0.900	1.077	1.033	1.029
2009—2010	1.038	0.885	0.999	0.919
2010—2011	1.113	0.989	0.867	0.894
2011—2012	0.972	1.202	1.012	1.123
2012—2013	1.109	0.994	0.777	0.853
2013—2014	1.094	1.095	0.857	1.013
2014—2015	1.018	0.999	0.945	0.965
2015—2016	0.966	1.018	1.576	1.546
2016—2017	1.013	0.989	1.060	1.055
2017—2018	1.265	0.915	1.142	1.331
2018—2019	0.998	0.983	1.072	1.051
平均值	1.025	1.019	1.010	1.036

由表 4 所示，从区域角度来看，长江经济带上游、中、下游地区的碳排放效率均呈现一定幅度的提升，分别为 4.6%、2.1%和 4.2%。相比较而言，经济相对落后的上游地区的碳排放效率增长最为明显。对于纯技术效率而言，中游、下游地区的提升幅度明显高于上游，说明中游、下游地区生产、管理方式的效率获得了提高。对于规模效率而言，上游、下游地区有更为明显的提升，分别提升了 2.1%和 3.8%，中游地区则只有 0.3%的小幅度提升，说明上、下游地区的运营规模得到了较强力度的优化。而对于技术进步，上游、下游地区的提升幅度分别为 1.5%和 2.2%，中游地区则下降了 0.4%，说明中游地区物流业的技术变化无法满足实际的生产活动。

表 42005—2019 年长江经济带分省份物流业碳排放效率变化

地区	碳排放效率变化指数	纯技术效率变化指数	规模效率变化指数	技术进步变化指数
上海	1.106	1.061	1.115	1.044
江苏	1.009	1.000	0.999	1.015
浙江	1.012	1.014	1.001	1.007
下游地区	1.042	1.025	1.038	1.022
安徽	1.058	1.043	1.013	1.007
江西	1.008	1.071	0.992	0.960
湖北	1.043	1.043	0.992	1.015
湖南	0.974	0.978	1.014	1.002
中游地区	1.021	1.034	1.003	0.996
重庆	1.002	0.985	1.006	1.014

四川	0.997	0.988	0.997	1.023
贵州	1.067	0.970	1.099	1.017
云南	1.117	1.122	0.983	1.009
上游地区	1.046	1.016	1.021	1.015
长江经济带	1.036	1.025	1.019	1.010

由表 4 所示，从省域角度来看，云南省物流业碳排放效率增长幅度最大，其增长率达到 11.7%，其中纯技术效率增长了 12.2%是主要原因，说明云南省可利用的技术能力得到了较大的提升。长江经济带实现物流业碳排放效率增长的共有 9 个省份，其中实现纯技术效率、规模效率和技术进步三者共同增长的省份包括上海、浙江和安徽。湖南和四川两个省份的碳排放效率呈现负增长的趋势，分别降低了 2.6%和 0.3%。纯技术效率下降了 2.2%是湖南碳排放效率降低的主要原因，而四川的碳排放效率降低主要是纯技术下降了 1.2%和规模效率下降了 1.2%导致的。从分解情况来看，长江经济带 11 个省份的技术进步变化指数只有江西小于 1，说明长江经济带低碳物流业的生产技术发展处于良好的态势。

2.3 长江经济带物流业碳排放效率的空间格局分析

2.3.1 长江经济带物流业碳排放效率全局空间自相关分析

为了分析各省份之间物流业碳排放效率的相关性，以 2005—2019 年各省份物流业碳排放效率值为数据基础，通过 GeoDa 软件得出 Moran' sI 指数，计算结果见表 5。Moran' sI 指数取值范围一般在-1~1 之间，指数绝对值体现了局域空间的集聚状态。由表 5 可知，样本期内，长江经济带整体碳排放效率水平表现出了较为显著的空间正相关性，整体上呈现波动后显著上升的格局。除 2009 年、2011 年和 2013 年的 Moran' sI 指数为负值外，且指数绝对值相对较小，负相关的特征不突出。2018 年、2019 年的 Moran' sI 指数明显升高，其中，2018 年的 Moran' sI 指数达到样本期内的最高值 0.659，说明在 2018 年，长江经济带地区间的正相关性最强。整体上来看，长江经济带地理邻近区域的物流业碳排放效率值呈相对集聚的现象，说明长江经济带物流业碳排放效率之间具有集聚性。

2.3.2 长江经济带物流业碳排放效率局部空间自相关分析

全局自相关分析主要是观察长江经济带地区物流业碳排放效率的整体聚集程度，为了进一步测算局部区域在邻近空间的聚集程度，本文采用局部空间自相关对 2005 年、2012 年和 2019 年长江经济带物流业碳排放效率水平进行空间异质性分析。莫兰散点图可以判断各个城市之间物流业碳排放效率水平的空间相关程度，由四个象限组成，其中第一象限为物流业碳排放效率水平高—高（H-H 型）集聚地区，该地区与邻近地区的物流业碳排放效率均呈现较高的水平，空间内部的差异性相对较小；第二象限为物流业碳排放效率水平低—高（L-H 型）集聚地区，该地区本身呈现较低的物流业碳排放效率，但邻近地区则呈现较高的碳排放效率，空间内部的差异性相对较大；第三象限为物流业碳排放效率水平低—低（L-L 型）集聚地区，该地区不仅本身碳排放效率低，邻近地区碳排放效率也表现出较低水平，空间内部的差异性相对较小；第四象限为物流业碳排放效率水平高—低（H-L 型）集聚地区，该地区本身呈现较高的碳排放效率，但邻近地区却显现偏低的碳排放效率，空间内部的差异性相对较大。

表 5 2005—2019 年长江经济带碳排放效率的全局 Moran' sI

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Moran' sI 指数	0.056	0.101	0.290	0.304	-0.078	0.041	-0.182	0.163

年份	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	—
Moran' sI 指数	-0.004	0.114	0.002	0.018	0.015	0.659	0.619	—

由图 3 可知,2005—2019 年长江经济带物流业碳排放效率的局域空间集聚状态发生了较为显著的变化。2005 年分布在 H-H 型、L-H 型、L-L 型和 H-L 型区域的省份个数分别为 3 个、3 个、4 个和 1 个,主要集中在第一、第二、第三象限;2012 年分布在 H-H 型、L-H 型、L-L 型和 H-L 型区域的省份个数分别为 2 个、3 个、3 个和 3 个,较为均匀地分布在四个象限;2019 年分布在 H-H 型、L-H 型、L-L 型和 H-L 型区域的省份个数分别为 4 个、2 个、5 个和 0 个,大部分省份分布在第一、第三象限。在样本期内,物流业碳排放效率呈 H-H 型或 L-L 型集聚形态的省份由 7 个升至 9 个,占比由 63.6%增至 81.8%;物流业碳排放效率呈 H-L 型或 L-H 型集聚的省份由 4 个降至 2 个,占比由 36.4%降至 18.2%。这说明在 2005—2019 年间物流业碳排放效率的空间同质性不断增强,异质性逐渐减弱,空间差异有进一步缩小的趋势。具体来看,江西和上海从 2005 年的 L-H 型由于物流业碳排放效率的提升逐步成为 2019 年的 H-H 型,江苏和湖南则由于物流业碳排放效率的降低分别从 2005 年的 H-H 型和 H-L 型变化为 2019 年的 L-H 型和 L-L 型。在样本期内,安徽和浙江稳定保持在 H-H 型区域内,两个省份低碳物流业均有较高的发展水平,在区域内起到积极拉动的带头作用;湖北保持在 L-H 型区域内,应优化自身物流业的运营规模,加强与安徽和江西的区域合作,进一步提升碳排放效率;贵州、云南、四川和重庆稳定保持在 L-L 型区域内,应充分发展和使用可再生能源和清洁能源,尽快改进能源结构,依据自身发展需要适当引进先进技术和人才以提高碳排放效率。

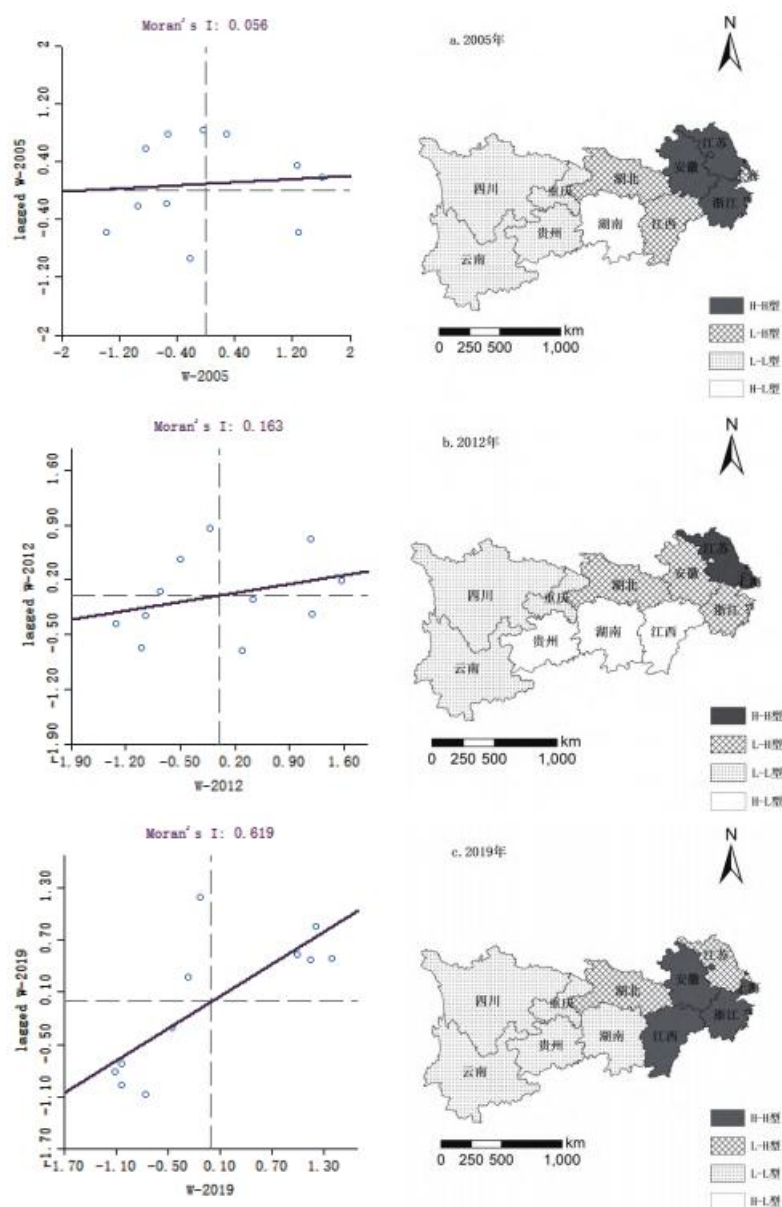


图3 2005年、2012年和2019年长江经济带物流业碳排放效率局部莫兰散点图

3 结论与建议

本研究基于包含非期望产出的超效率 SBM 模型与 ML 指数，对 2005—2019 年长江经济带物流业碳排放效率及其分解进行了时序特征的分析，再利用莫兰指数对其进行空间特征的分析，主要结论如下：

(1) 2005—2019 年，长江经济带整体物流业碳排放量表现出增长率逐步放缓的上升趋势。碳排放效率总体波动平缓，均值为 0.671，呈“上游<中游<下游”的局面，其中除江苏外，其他省份仍和生产前沿有较大差距。

(2) 样本期内，长江经济带物流业碳排放效率平均提高了 3.6%，主要归功于纯技术效率的提高和规模效率的增长，上、中、下游地区的碳排放效率均呈现一定幅度的提升。云南物流业碳排放效率由于其可利用技术能力的明显进步而增长幅度最大，而湖南和四川因纯技术效率的下降呈现负增长的趋势。

(3) 2005—2019 年, 长江经济带地理邻近区域物流业碳排放效率呈现由弱到强的正向空间关联格局, 发展模式以 L-L 型集聚为主, H-H 型集聚次之。局部空间集聚状态变化显著, 异质性不断减弱, 空间差异不断缩小。根据以上研究结论, 结合长江经济带低碳物流业的发展情况, 提出以下建议:

(1) 降低能源消耗, 助推低碳物流产业深层次的转型升级。通过新型能源的应用从源头减少能源消耗带来的碳排放, 包括增加生物燃料在物流业的使用范围、推广使用合成燃料和提高运输电气化程度。采用多式联运的举措, 通过比如集装化运输等方式, 降低物流需求的投入成本进一步提升物流效能, 同时公铁联运、铁江联运能有效减少能源消耗和环境污染, 进一步推进物流业节能降碳。

(2) 引入低碳技术, 通过市场化手段将科技成果转化到产业升级。拓宽新能源设备在物流行业的使用渠道, 具体表现在提高以新能源车为代表的低能耗、低排放的新能源设备在物流配送、港口作业等领域的应用。将大数据、人工智能、货物跟踪定位等新兴技术应用在物流行业, 通过智能仓储、共享运输、共享仓储等方式来提升碳排放效率, 实现物流业低碳化发展。

(3) 加强区域合作, 实现长江经济带上、中、下游三大区域优势互补。长江经济带三大区域内物流企业应与实时物流需求紧密关联, 在积极对接供应链运作和管理模式的基本条件下, 同时优化企业流程、提升企业效率和创新企业模式, 起到协同倍增的作用。下游地区可以充分发挥自身物流业高水平发展的优势, 与云南、四川等中上游地区构建相应的产业协作和对口帮扶机制, 推进长江经济带物流产业的低碳化发展。中游地区与长三角城市群相邻, 应发挥“中心—外围”的空间优势, 推动物流业产业协作, 并将此视为经济发展和物流低碳化创新能力进一步提高的重要动力。

参考文献:

- [1] 李小帆, 邓宏兵. 长江经济带新型城镇化协调性的空间差异与时空演化[J]. 长江流域资源与环境, 2016 (5): 725-732.
- [2] 李慧, 李玮. 物流业碳排放效率评价及动态演化分析: 以“丝绸之路经济带”沿线省区为例[J]. 环境科学与技术, 2019 (3): 165-171.
- [3] 张立国. 物流业能源消耗与碳排放研究进展[J]. 技术经济与管理研究, 2016 (1): 119-123.
- [4] Kaya Y, Yokobori K. Environment, energy, and economy: Strategies for sustainability [M]. Delhi: Bookwell Publications, 1999.
- [5] Mielnik O, Goldemberg J. Foreign direct investment and decoupling between energy and gross domestic product in developing countries [J]. Energy Policy, 2002, 30(2): 87-89.
- [6] Jobert T, Karanfil F, Tykhonenko A. Convergence of per capita carbon dioxide emissions in the EU: Legend or reality? [J]. Energy Economics, 2010, 32(6): 1364-1373.
- [7] Zofio J L, Prieto A M. Environmental efficiency and regulatory standards: The case of CO2 emissions from OECD industries [J]. Resource and Energy Economics, 2001, 23(1): 63-83.
- [8] Ramanathan R. Combining indicators of energy consumption and CO2 emissions: A

cross-country comparison [J]. International Journal of Global Energy Issues, 2002, 17(3): 214-227. [9] Zhou P, Ang B W, Han J Y. Total factor carbon emission performance: A Malmquist index analysis [J]. Energy Economics, 2010, 32(1): 194-201.

[10] 田云, 王梦晨. 湖北省农业碳排放效率时空差异及影响因素[J]. 中国农业科学, 2020 (24): 5063-5072.

[11] 蔺雪芹, 边宇, 王岱. 京津冀地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素[J]. 经济地理, 2021 (6): 187-195.

[12] 宁论辰, 郑雯, 曾良恩. 2007—2016 年中国省域碳排放效率评价及影响因素分析——基于超效率 SBM-Tobit 模型的两阶段分析[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2021 (1): 181-188.

[13] 刘鑫, 李顺龙. 基于三阶段 DEA 模型的我国少数民族地区碳排放效率研究[J]. 黑龙江民族丛刊, 2021 (1): 55-63.

[14] Lin B Q, Fei R L. Regional differences of CO₂ emissions performance in China's agricultural sector: A Malmquist index approach [J]. European Journal of Agronomy, 2015, 70: 33-40.

[15] 吴贤荣, 张俊飏, 田云, 等. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究——基于 DEA-Malmquist 指数分解方法与 Tobit 模型运用[J]. 资源科学, 2014 (1): 129-138.

[16] 王兆峰, 杜瑶瑶. 基于 SBM-DEA 模型湖南省碳排放效率时空差异及影响因素分析[J]. 地理科学, 2019 (5): 797-806.

[17] 欧国立, 许畅然. 京津冀货运碳排放效率分析——基于超效率 SBM 模型及 ML 指数[J]. 北京交通大学学报 (社会科学版), 2020 (2): 48-57.

[18] 邵海琴, 王兆峰. 长江经济带旅游业碳排放效率的综合测度与时空分异[J]. 长江流域资源与环境, 2020 (8): 1685-1693.

[19] 李铭泓, 黄羿, 朱伟俊, 等. 中国交通运输业碳排放全要素生产率研究——基于 GlobalMalmquist-Luenberger 指数[J]. 科技管理研究, 2021 (9): 203-211.

[20] 汪中华, 于孟君. 中国石化行业二氧化碳排放的影响因素分解——基于广义迪氏指数分解法[J]. 科技管理研究, 2019 (24): 268-274.

[21] 姚丹, 任丽燕, 马仁锋, 等. 长三角旅游业碳排放强度空间格局及影响因素分析[J]. 生态科学, 2021 (2): 89-98.

[22] 王凯, 唐小惠, 甘畅, 等. 中国服务业碳排放强度时空格局及影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2021 (8): 23-31.

[23] Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacksbased measure (SBM) approach [R]. Japan: The Operations Research Society of Japan, 2004.

[24] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.

[25] Färe R, Grosskopf S, Norris M. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries: Reply [J]. American Economic Review, 1994(1): 66-83.

[26] 张立国. 中国物流业能源消耗与二氧化碳排放效率测度及分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

[27] 刘秉镰, 李清彬. 中国城市全要素生产率的动态实证分析: 1990—2006——基于 DEA 模型的 Malmquist 指数方法[J]. 南开经济研究, 2009 (3): 139-152.

[28] 邓学平, 王旭, NgASF. 我国物流企业生产效率与规模效率[J]. 系统工程理论与实践, 2009 (4): 34-42.